



ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Resumo: *A distribuição de energia elétrica a partir das usinas até as subestações estão crescendo cada vez mais. Como o sistema de transmissão tem se expandido ao longo das décadas, o excedente dessa capacidade nas linhas de transmissão tende a ser consumido com o crescimento do sistema ou conforme o desenvolvimento de planos mais econômicos para atender a demanda. Com essa expansão torna-se necessário compreender as considerações e restrições envolvidas na criação do mesmo no que tange as operações e a confiabilidade do processo. Desta forma, o Sistema Elétrico de Potência está sujeito a ocorrências de faltas comprometendo a continuidade do fornecimento de energia elétrica, visto que, é composto por diversos componentes que podem danificar ao longo do tempo, estando sujeito a interferências externas, como descargas elétricas, quedas de árvores, além de falta provocada pela operação humana. Assim, é de suma importância a identificação da falta e do local no qual ocorreu na Linha de Transmissão em um menor tempo possível para uma rápida manutenção e restabelecimento do fornecimento de energia, contribuindo para melhoria do indicador de qualidade de energia. Portanto, o presente trabalho analisa e compara os diversos tipos de algoritmos de localização de faltas em linha de transmissão longa existentes na literatura, fazendo uma análise de tempo e da precisão da localização da falta entre eles, utilizando os softwares ATP/DRAW (Alternative Transients Program) e MATLAB para as simulações, visando permitir a comparação dos resultados com os obtidos nos artigos pesquisados.*

Palavras-chave: *localização de faltas, ondas viajantes, transformada wavelet.*



1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem um papel relevante no desenvolvimento de um país. Segundo Elgerd (1978), a energia elétrica constitui a “força muscular” da sociedade industrial e a sua abundância assegura o poder da indústria como padrão de vida do ser no corpo social. A busca por esta abundância possibilitou a visualização de um crescimento significativo dos sistemas elétricos de potência nas últimas décadas, resultando em um incremento do número de linhas de transmissão e distribuição. Este crescimento vem acompanhado do aumento de restrições técnicas, vislumbrando a melhoria da qualidade e continuidade do fornecimento de energia. Continuidade esta que é avaliada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio de indicadores que monitoram as interrupções, frequências e durações nas unidades consumidoras.

Além dos indicadores, há ocorrências de situações inesperadas em sistemas de transmissão de energia elétrica que pode causar a interrupção no fornecimento de energia. Esta ocorrência aleatória e imprevisível, na maioria das vezes, é conhecida como falta. A interrupção do fornecimento é realizada por equipamentos de proteção, visando resguardar a estabilidade do sistema e os equipamentos envolvidos na transmissão elétrica. O rápido restabelecimento do fornecimento de energia depende da localização do ponto no qual a falta ocorreu no sistema e da realização dos reparos necessários. Essas faltas podem ocorrer de cinco formas: monofásica, bifásica, trifásica, bifásico-terra e trifásico-terra.

As faltas podem ocorrer devido a diversos fatores, como: problemas na isolamento, “queimadas” próximas as linhas de transmissão, contatos entre os cabos da linha de transmissão (devido ao envolvimento de agentes externos), entre outros. As linhas de transmissões trifásicas compõem a maior parte do sistema de transmissão de energia no Brasil e a maioria das faltas que ocorrem são as que envolvem o contato de uma das fases com a terra (ANEEL, 2016).

Com o objetivo de minimizar os efeitos causados pelas faltas e garantir um serviço de qualidade, as concessionárias têm investido bastante em sistemas de proteção automáticas e redes inteligentes (*smart grids*), para que haja uma detecção do problema e rapidez na solução.

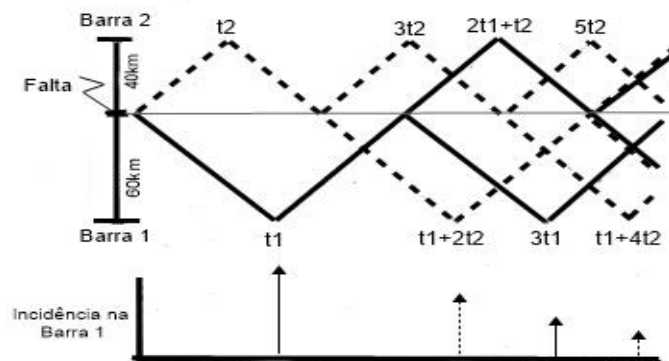
Entretanto, as Linhas de Transmissão (LT) possuem grandes extensões, tornando impossível, ou ao menos inviável o monitoramento ao longo do seu comprimento. Assim, a localização visual, passa a ser um processo demorado devido ao ambiente, pois geralmente há lugares não povoados e de difícil acesso para as equipes de inspeção. Como o tempo da falta implica diretamente nos indicadores e conseqüentemente em despesas, as empresas de energia buscam constantemente soluções para tal problema. Portanto, nas últimas décadas a engenharia vem em busca de soluções por meio de métodos de análises de impedância aparente, ondas viajantes e transitórios de altas frequências.

Para a impedância aparente, embora um curto circuito entre fase e terra resulte em valores muito altos de corrente, dificilmente a impedância se anula. Em geral, as faltas provocam um arco, no qual a impedância entre linha e terra dependem da resistência. A resistência do solo pode variar de 10 a 100 vezes, entre seco e umidade excessiva (STEVENSON, 1986). A localização por meio deste método é bem limitada, pois baseia-se em redes equilibradas sem ramificações e possui um alto índice de incertezas devido a sua variação com o carregamento da rede.

Para transitórios de altas frequências, trata-se de um método que avalia o nível de energia do espectro causado pela falta. Para facilitar os cálculos, aplica-se a transformada de Laplace no transitório gerado afim de analisar a componente de maior energia, e a partir desta frequência determina-se a distância da falta.

No estudo pelas ondas viajantes, o processo de localização de falta utiliza algoritmos que determinam os instantes de reflexão, podendo ser implantado em um ou mais terminais da rede (BEWLEY, 1963). O método consiste em analisar a chegada da primeira onda e a chegada da sua reflexão, conforme apresenta-se a Figura 1:

Figura 1 - Refração e reflexão de ondas viajantes.



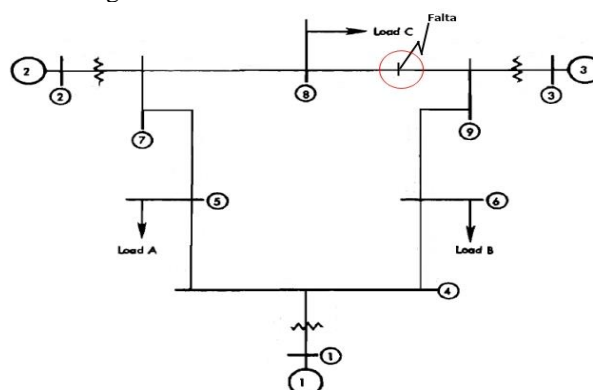
Fonte: Elaboração própria.

O uso da transformada *wavelet* tem sido utilizada para análise de transitórios eletromagnéticos gerados por faltas no sistema de potência, no qual os tempos de propagação dos coeficientes tornam-se semelhantes ao método de Magnago e Abur (1998). Ao transformar um sinal de tensão com as características da falta por meio do módulo, obtém-se um espectro similar a parte inferior da Figura 1, no qual os eixos das abscissas referenciam o tempo. Após um intervalo de tempo, estas ondas são rapidamente multiplicadas concomitantemente com a atenuação das mesmas, podendo também ocorrer algumas sobreposições entre si. A transformada de *wavelets* de uma função pertence ao espaço das funções quadraticamente integráveis, sendo a sua decomposição formada por expansões, compressões e translações de uma única função mãe $\psi(t)$, chamada de *wavelet* (Daubechies, 1991).

2 MATERIAS E MÉTODOS

Os materiais utilizados foram os softwares ATPDraw (Alternative Transients Program) e o MATLAB (MATHWORKS, Trial Version, 2016) para a simulação e análise do comportamento dos transitórios. As simulações foram realizadas a partir do Sistema Teste IEEE 9 barras, conforme apresenta-se na Figura 2. A falta foi inserida entre a linha 8-9.

Figura 2 – Sistema teste de 9 barras IEEE.

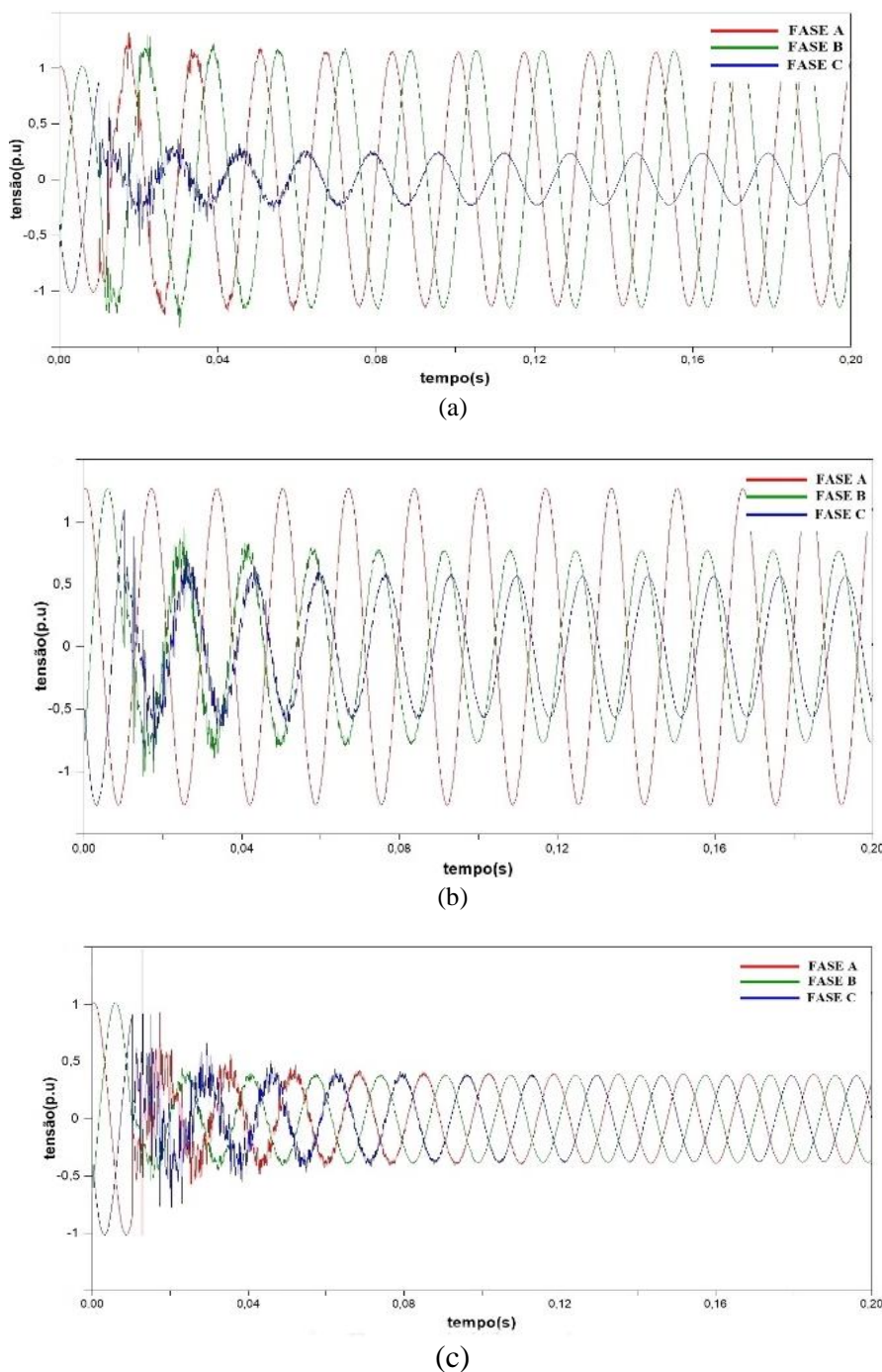


Fonte: Adaptado de (STEVENSON, 1986).



A linha entre as barras 8 e 9 foram segmentadas para inserção da falta considerando um sistema inicialmente estável. Utilizou-se uma resistência de falta de 1Ω para ambos os casos, e a taxa de amostragem de $5 \mu s$ para melhor resolução de resposta. Após execução da simulação, o transitório foi gerado, conforme apresenta-se na Figura 3. Com os dados salvos em planilha, os mesmos foram processados com a ferramenta "Wavelet Design & Analysis" do *toolbox* do Matlab, que tem como função descrever e decompor a função que representa o transitório em frequência para o domínio do tempo.

Figura 3 Sinal de tensão após a falta – a) 30km de distância. b) 30km de distância c)70km de distância



Fonte: Autoria própria.



Para eliminar os ruídos, foi configurado no modo unidimensional discreta, o modo *sym3 level 1* onde os coeficientes *wavelet (cw)* são elevados ao quadrado.

Para os curtos-circuitos monofásicos, a distância pode ser confundida na análise do segundo pico de *cw*, pois esta pode ser a reflexão do terminal com o local no ponto de falta caso venha ocorrer na primeira metade da linha ou a refração da reflexão do terminal distante. Conforme Silva (2003), para curtos-circuitos monofásicos torna-se necessário uma pré-localização, pois no momento em que a onda é refletida/refratada no local da falta há uma alta atenuação do sinal.

De acordo com o método de Coury (1987), é possível avaliar o tipo de falta. No Tabela 1 apresenta-se um resumo detalhado da identificação:

Tabela 1 – Método utilizado para identificação da falta.

	Falta
Faltas monofásicas:	
$\frac{Ia}{2} > Ib, e \frac{Ia}{2} > Ic$	Fase A
$\frac{Ib}{2} > Ia, e \frac{Ib}{2} > Ic$	Fase B
$\frac{Ic}{2} > Ib, e \frac{Ic}{2} > Ia$	Fase C
Faltas bifásicas:	
$\frac{Ia}{2} > Ic, Ib \cong Ia \text{ e } I' > Imin$	Fase ABT
$\frac{Ia}{2} > Ic, Ib \cong Ia \text{ e } I' < Imin$	Fase AB
$\frac{Ib}{2} > Ia, Ib \cong Ic \text{ e } I' > Imin$	Fase BCT
$\frac{Ib}{2} > Ia, Ib \cong Ic \text{ e } I' < Imin$	Fase BC
$\frac{Ia}{2} > Ib, Ia \cong Ic \text{ e } I' > Imin$	Fase ACT
$\frac{Ia}{2} > Ib, Ia \cong Ic \text{ e } I' < Imin$	Fase AC
Faltas trifásicas:	
$Ia \cong Ib \cong Ic$	Fase ABC ou ABCT

Fonte: Autoria própria.

Após determinar o tipo de falta, seleciona-se o sinal de tensão da fase e mediante o transitório eletromagnético, encontra-se o tempo de viagem (*tw*). A velocidade de propagação na linha de transmissão (*vp*) é aproximadamente 3.105 km/s, logo, a distância da falta, é:

$$Df1 = \frac{tw * vp}{2} \tag{1}$$



Para faltas na primeira metade da linha:

$$Df2 = L - \frac{tw * vp}{2} \quad (2)$$

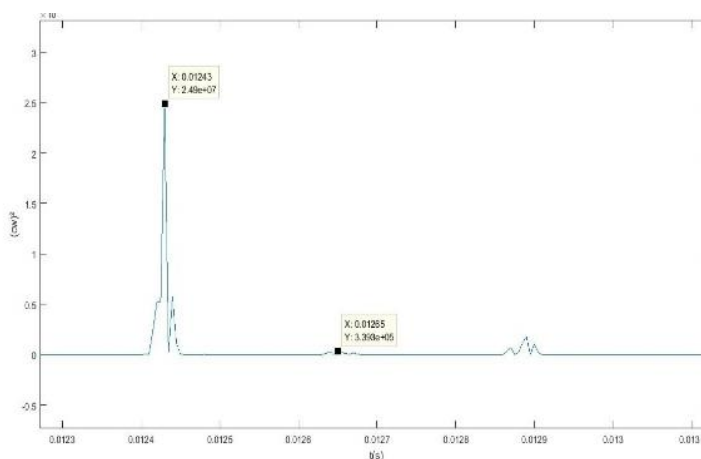
em que L é o comprimento total da linha de transmissão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema desenvolvido no ATPDRAW difere do Matlab/Simulink na geração e cargas, pois o primeiro foi inserido tensão e impedância, já no segundo foi configurado, além destes, a potência ativa e reativa. A falta foi simulada, no ATPDraw, por meio de chaves controladas pelo tempo e no Simulink possui um bloco de falta configurável.

As faltas próximas à metade da linha, demonstram maior instabilidade nos resultados, e as faltas da segunda metade da linha, por sofrerem fortes atenuações na resposta (reflexão ou refração na falta), não possibilitam a localização, conforme apresenta-se a Figura 4:

Figura 4 - Segundo sinal muito fraco para localização.

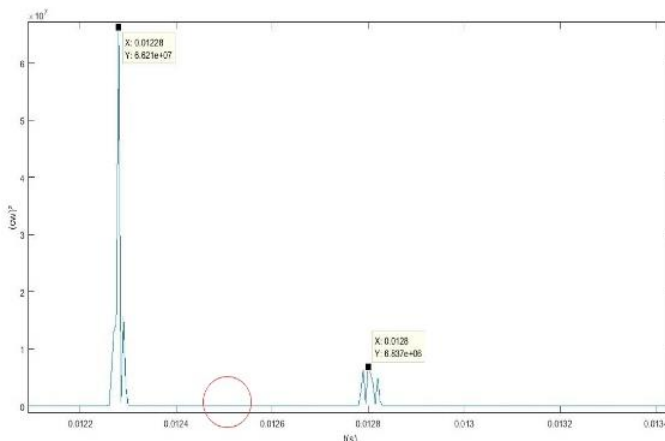


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5 apresentam-se os sinais utilizados. Os valores $X1 = 0.01243$ e $X2 = 0.01263$, são calculados por meio da equação $Df2$ por estarem na segunda metade da linha. Em alguns casos o sinal localizado em $X2$ foi perdido, resultando em algumas lacunas nas Tabelas 2 e 3.



Figura 5 - Segundo sinal muito fraco para localização.



Fonte: Autória própria.

Os resultados obtidos para as demais faltas e distâncias são comparados no Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos das simulações.

Tipo de Falta	Distância Real (km)	Distância estimada ATPDraw (km)	Distância estimada Simulink (km)	Erro (%) ATPDraw	Erro (%) Simulink
Monofásica	30	33	42	10	40
Monofásica	45	51	63	13,3	40
Monofásica	50	57	70,5	14	41
Monofásica	70	76,5	88,5	9,3	26,4
Bifásica	30	33	34,5	10	15
Bifásica	45	--	52,5	--	16,6
Bifásica	50	--	57	--	14
Bifásica	70	70	81	0	15,7
Bifásico-terra	30	33	34,5	10	15
Bifásico-terra	45	51	52,5	13,3	16,6
Bifásico-terra	50	57	57	14	14
Bifásico-terra	70	73	91	4,3	30
Trifásica	30	33	34,5	10	15
Trifásica	45	--	52,5	--	16,6
Trifásica	50	--	57	--	14



"Os desafios para formar hoje o engenheiro do amanhã"

Trifásica	70	--	--	--	--
Trifásico-terra	30	33	34,5	10	15
Trifásico-terra	45	--	52,5	--	16,6
Trifásico-terra	50	--	55,5	--	11
Trifásico-terra	70	--	--	--	--
Média erro :				9,85	20,6944

Fonte: Autoria própria.

Todos os erros foram para um valor maior do que o esperado, o que implica na velocidade de propagação do sinal, que para este caso deve ser inferior à 3.105 km/s. As medições realizadas, próxima e/ou no meio da linha, apresentaram maiores erros no ATPDraw, enquanto no Simulink os erros aumentaram com a distância. De forma experimental, obteve-se uma velocidade de propagação na linha de transmissão, no qual a partir do tempo de 390 μ s um transitório percorre uma LT de 100 km no Simulink e no ATPDraw um tempo de 380 μ s, com velocidades de 256410km/s e 263158km/s, respectivamente. Dessa forma, os resultados anteriores são alterados, conforme apresenta-se na Tabela 3.

Tabela 03 – Resultados obtidos diante de velocidades empíricas.

Tipo de falta	Distância real (km)	Distância estimada ATPDraw (km)	Distância estimada Simulink (km)	Erro (%) ATPDraw	Erro (%) Simulink
Monofásica	30	28,94727	35,8974	-3,5091	19,658
Monofásica	45	44,73669	53,8461	-0,58	19,658
Monofásica	50	49,99983	60,25635	-0,00034	20,5127
Monofásica	70	67,1050	75,64095	-4,1356	8,0585
Bifásica	30	28,94727	29,48715	-3,5091	-1,7095
Bifásica	45	--	44,87175	--	-0,285
Bifásica	50	--	48,7179	--	-2,5642
Bifásica	70	61,4033	69,2307	-12,281	-1,099
Bifásica-terra	30	28,94727	29,48715	-3,5091	-1,7095
Bifásica-terra	45	44,73669	44,87175	-0,58	-0,285
Bifásica-terra	50	49,99983	48,7179	-0,00034	-2,5642
Bifásica-terra	70	64,03487	77,7777	-8,5216	11,111
Trifásica	30	28,94727	29,48715	-3,5091	-1,7095



Trifásica	45	--	44,87175	--	-0,285
Trifásica	50	--	48,7179	--	-2,5642
Trifásica	70	--	--	--	--
Trifásica-terra	30	28,94727	29,48715	-3,5091	-1,7095
Trifásica-terra	45	--	44,87175	--	-0,285
Trifásica-terra	50	--	47,43585	--	-5,1283
Trifásica-terra	70	--	--	--	--
Média erro :				3,6370	4,3707

Fonte: Autoria própria.

Para estes resultados, o Simulink mostrou-se eficiente, exceto para faltas monofásicas que houveram alguns valores discrepantes, enquanto o ATPDraw manteve um padrão, no qual para as faltas alocadas no meio da LT, o resultado mostrou-se preciso.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimações foram realizadas a partir da velocidade de propagação em seus respectivos modelos de linhas de transmissão, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema 9 barras IEEE montados em ambos os softwares, ATPDraw e Simulink, em condições de funcionamento similares. Não foram feitos estudos no tratamento do sinal, como amplificação da frequência característica ou atenuação de ruídos. De modo geral, as ondas refletidas do sinal gerado pelo ATPDraw, possuíam amplitudes maiores em relação ao Simulink, facilitando assim a distinção entre a onda primária e as secundárias. Alguns erros de estimação podem estar relacionados a este fato: a atenuação da onda principal e, conseqüentemente a captura de uma onda secundária. Gerando uma diferença de μ s (microssegundos) no tempo, que leva a algumas centenas de metros na distância.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Desafios na Operação do SIN – 2015/2018**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/ppt/ONS.pptx>. Acesso em: 15 de ago. 2018.

ANEEL. **Relatório de Análise: desligamentos forçados do Sistema de Transmissão 2016**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relatório+de+Análise+Desligamentos+Forçados+-+Edição+2016/>. Acesso em: 15 de ago. 2018.

BEWLEY, Loyal Vivian. **Traveling waves on transmission systems**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 50, n. 2, p. 532-550, 1931.



COURY, D. V. **Um estimador ótimo aplicado à proteção dos sistemas elétricos de potência.** 1987. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ELGERD, Olle Ingemar. **Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica.** McGraw-Hill do Brasil, 1978.

GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas. **Power System Analysis & Design**, SI Version. Cengage Learning, 2012.

MAGNAGO, Fernando H.; ABUR, Ali. Fault location using wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 4, p. 1475-1480, 1998.

SILVA, Murilo da. **Localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria de ondas viajantes e transformada wavelet.** 2003. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

ANALYSIS AND COMPARISON OF FAULT LOCATION METHODS IN TRANSMISSION LINES

Abstract: *The distribution of electricity from the plants to the substations is growing more and more. As the transmission system has expanded over the decades, the excess of this capacity in the transmission lines tends to be consumed with the growth of the system or according to the development of more economical plans to meet the demand. With this expansion, it becomes necessary to understand the considerations and restrictions involved in creating it with regard to the operations and the reliability of the process. In this way, the Electric Power System is subject to occurrences of faults, compromising the continuity of the electric power supply, since it is composed of several components that can damage over time, being subject to external interference, such as electrical discharges, falls of trees, in addition to lack caused by human operation. Thus, it is extremely important to identify the fault and the place where it occurred on the Transmission Line in the shortest possible time for a quick maintenance and restoration of the energy supply, contributing to the improvement of the energy quality indicator. Therefore, the present work analyzes and compares the different types of fault location algorithms in long transmission lines existing in the literature, making an analysis of the time and the accuracy of the fault location between them, using the software ATPDRAW (Alternative Transients Program) and MATLAB for the simulations, aiming to allow the comparison of the results with those obtained in the researched articles.*

Keywords: *fault location, traveling waves, wavelet transform.*